

円偏波用電波吸収体の性能評価技術の開発

吉村慶之* 橘泰至* 西田斉** 八木谷聡*** 長野勇***

電波を用いたデータ通信技術の開発，利用が盛んに行われている一方で，電波の混信や不要波による周辺機器の誤動作などの問題が発生している。この対策法として電波吸収体による不要波の抑制があり，この開発を支援するため，吸収体の性能評価測定システムを構築してきた。本研究では電波吸収性能評価の精度向上手法の検討を行った。また，円偏波の吸収性能を専用アンテナ無しで評価するため，直線偏波による吸収性能から円偏波の吸収性能を理論的に合成する換算式を提示し，換算結果と円偏波用アンテナによる評価結果を比較することで有用性を示した。

キーワード：電波吸収体，円偏波，反射係数

Development of an Evaluation Technique for Wave Absorbers for Circularly Polarized Electromagnetic Waves

Yoshiyuki YOSHIMURA, Yasushi TACHIBANA, Hitoshi NISHIDA, Satoshi YAGITANI and Isamu NAGANO

With electronic data communication technology becoming widely developed and utilized, electromagnetic interference and malfunction of electronic equipment have become serious problems. An electromagnetic wave absorber is considered to be one of the solutions to these problems. We have been developing an evaluation system to support development of the absorber. In this study, we examined the method for improving the precision of the system, in order to evaluate the wave absorption performance of the absorber. We also presented a formula for converting the absorption performance of linearly polarized waves to that of circularly polarized waves by combining vectors of linearly polarized waves for the purpose of examination without using a circularly polarized wave antenna. We then compared the result of the conversion with the result obtained through the use of a circularly polarized wave antenna, thus verifying the validity of the evaluation method.

Keywords : electromagnetic wave absorber, circularly polarized wave, reflection coefficient

1. 緒 言

高度情報化社会における電子技術の発展とともに，無線を用いたデータ通信技術の開発，利用が盛んに行われている。無線には電波，赤外線などが挙げられ，通信距離が長い，障害物があっても回折により通信ができる等の利点により電波による通信が多く用いられている。電波通信には，テレビ，ラジオ，携帯電話，無線LAN(Local Area Network：構内通信網)，GPS(Global Positioning System：全地球測位システム)，ETC(Electronic Toll Collection System：自動料金収受システム)などがあり，あらゆるところで利用されている。反面，電波の混信や不要波による周辺機器の誤動作などの問題が発生しており，有効な対策手法として電波吸収体による不要波，反射波の抑制がある。電波吸収体とは，これに電波が入射すると，材

料内部で熱に変換され，反射波がなく，また透過波もない材料であり，セラミックス，ゴム，樹脂，抵抗紙などで製作されている¹⁾。このように，電波の有効利用の拡大とともに電波吸収体のニーズは高まっており，吸収体メーカーでは，低コスト化，薄型化，広帯域化などを目指して電波吸収体の開発に取り組んでいる。

工業試験場では，開発を支援するため，これまでに材料の試作段階で幅広い周波数帯域で電波吸収性能を評価できるシステムを構築してきた。しかし，これらの評価は直線偏波によるもので，ETCや駐車場などの料金収受でこれからの普及が大いに期待されるDSRC(Dedicated Short Range Communication：専用狭域通信)は円偏波による通信を行っているため，対応ができていなかった。

そこで，本研究では電波吸収性能の評価時の誤差

*電子情報部 **ニッコー(株) ***金沢大学

要因と精度向上手法の検討を行い、次に、直線偏波による性能評価結果を利用して円偏波による性能評価へ換算する方法を検証したので報告する。

2. 電波吸収性能評価法の検討

2.1 試料とアンテナ間との距離

一般に電波吸収体は、電波源から十分に離れた地点(遠方界という)で使用される。したがって、その評価も遠方界で評価する必要があるが、電波源であるアンテナと吸収体である試料との距離をどの程度まで離せば良いかが明確になっていない。距離をおくことによって遠方界条件は満足されるが、測定器のダイナミックレンジが小さくなるため、評価法としては十分とは言えない。そこで、微小ダイポールアンテナを仮定し、試料とアンテナとの距離、吸収性能との関係を理論計算により検証した^{2),3)}。

計算には、図1に示すように水平に試料が設置されたモデルを用いて検討した。なお、試料として、①誘電体(比誘電率 $\epsilon_r=25-j6$, 比透磁率 $\mu_r=1$)、②磁性体($\epsilon_r=1$, $\mu_r=100-j6$)を仮定し、これらの電気的材定数は、周波数特性がないものとした。また、試料①, ②ともに、材料厚さ $d=1.5\text{mm}$ (共振周波数 $f_r=10\text{GHz}$), 15mm ($f_r=1\text{GHz}$), 150mm ($f_r=0.1\text{GHz}$)の3種類を仮定し、各試料には電波吸収体として成立させるため金属箔を裏打ちし、電波は透過しないものとする。なお、吸収性能として試料表面(図1の原点)での反射係数 R を評価した。

各試料の共振周波数において、アンテナとの距離 h を変更した場合の R を求めた計算結果を図2に示す。図中の凡例における表記 E, H はそれぞれ電気ダイポール、あるいは磁気ダイポールアンテナによるものである。これによると、 h を大きくすることにより、遠方界の R に収束していくことが確認できる。しかし、一般論として遠方界と見なせる $\lambda/(2\pi)$ (λ は波長)程度の距離($f_r=10\text{GHz}$ で約 4.8mm , $f_r=1\text{GHz}$ で約 47.7mm , $f_r=0.1\text{GHz}$ で約 477.5mm)では、遠方界としての吸収性能を全く評価できていな

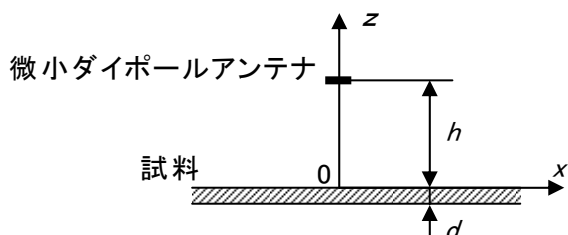
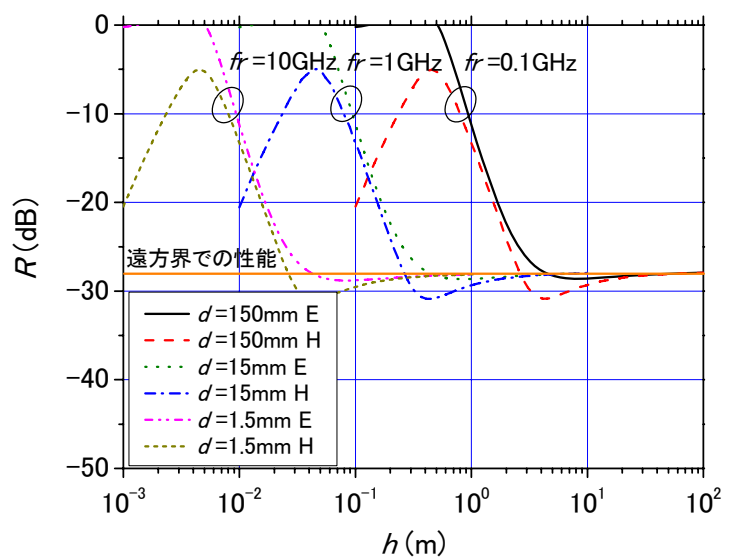


図1 計算モデル

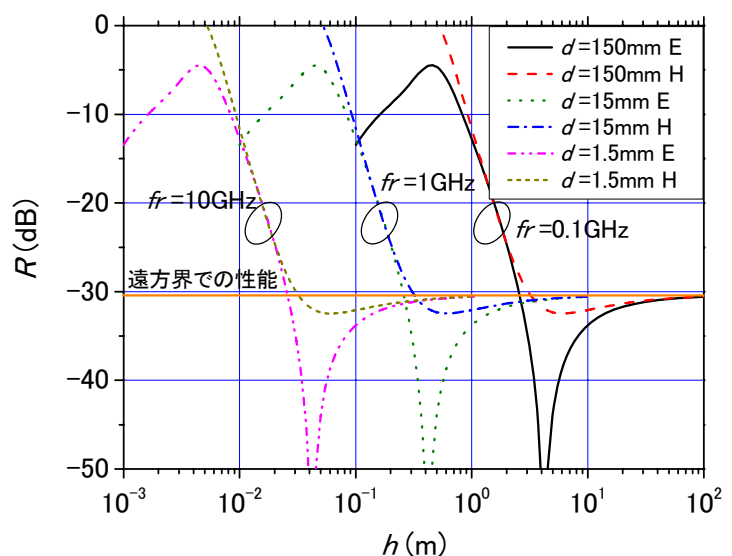
いことが分かる。

なお、誘電体の場合は磁気ダイポール、磁性体の場合は電気ダイポールのそれぞれアンテナの近傍における R が低く電波吸収性能が発現しているように見受けられるが、これは試料表面から内部にまで電波が入り込むことによる距離減衰に起因するものであり、電波吸収による減衰ではないものと考えられる。

以上は観測点を図1の原点として検討してきたが、実測定においての観測点は、アンテナと同じ位置に存在する。図2(b)より、磁性体を電気ダイポールアンテナで評価する際、遠方界での性能に収束しにくいことが分かった。そこで、この場合において観測点とアンテナが同じ位置にあり、吸収性能がそれぞれ -20dB , -30dB , -40dB , -50dB である磁性体試料を仮定し、 h を遠方より近づけ、誤差 err が $\pm 0.5\text{dB}$, $\pm 1\text{dB}$ となる点をプロットした結果を図3に示す。これによると、吸収性能が -50dB という非常に優れ



(a) 吸収体①



(b) 吸収体②

図2 波源と吸収体との距離による反射係数

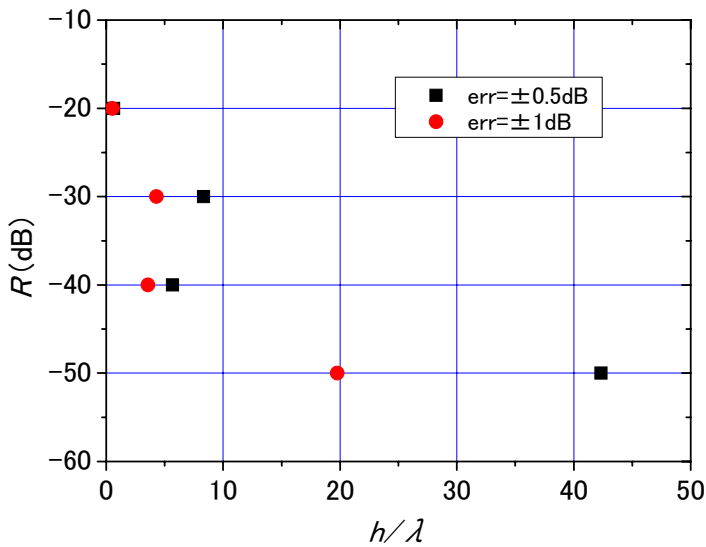


図3 試料とアンテナ間距離との関係

た電波吸収体以外であれば、-30dB の場合で 4.3λ 、あるいは 8.3λ の距離をおくことで、それぞれ、誤差が $\pm 1\text{dB}$ 、 $\pm 0.5\text{dB}$ 以内で測定できることが分かる。設計、製造時の品質管理等の点から -50dB という吸収性能を維持することは困難であり、-40dB あれば十分であることと、性能評価時の試料位置決め精度等の点から測定誤差は $\pm 1\text{dB}$ あれば実用に供すること等を考慮すると、ダイポールアンテナを波源とした場合の性能評価時には、試料との距離を 5λ とすることにより、十分満足できる性能評価ができると言える。

2. 2 円偏波による性能評価

ETCやDSRCは円偏波による無線通信技術を用いており、これらに用いる電波吸収体は円偏波による性能評価を行う必要がある。円偏波は、電界強度 \mathbf{E} が一定の強度で回転しながら伝搬し、通常の直線偏波に比べ偏波に方向性がないため、移動体通信によく用いられている。円偏波の測定には専用のアンテナが必要であるが、円偏波自体は理論上直線偏波の合成によっても実現できる。そこで、直線偏波による反射係数を合成して⁴⁾、円偏波の反射係数を電磁場的な導出を試みた。

具体的には、図 4 に示す右旋円偏波の入射モデルにおいて、TEモード (\mathbf{E} が y 軸方向: \mathbf{E}_{TE}) と TMモード (\mathbf{E}_{TM}) の入射波に $\pi/2$ rad の時間的位相差を与え、それぞれモードごとに理論展開し、最終的にベクトル合成することによって円偏波の反射係数を求めることができる⁵⁾。電界強度について式で表現すると、TEモードでの入射波、及びTMモードでの入射波をベクトル合成したものは式(1)のようになる。

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^{\text{I}} &= E_{\text{TMx}}^{\text{I}} \mathbf{i} + E_{\text{TEy}}^{\text{I}} \mathbf{j} + E_{\text{TMz}}^{\text{I}} \mathbf{k} \\ &= \left(e^{j\omega t} \mathbf{j} + e^{j(\omega t - \frac{\pi}{2})} (\cos \theta_0 \mathbf{i} + \sin \theta_0 \mathbf{k}) \right) F_0 e^{-jk_0(x \sin \theta_0 - z \cos \theta_0)} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 ω は角周波数、 t は時間、 θ_0 は入射角、 F_0 は入射波の振幅、 k_0 は自由空間における波数、 x 、 z は座標、上付添字 I は入射波であることを表し、下付添字 TE、TM はモード、 x 、 y 、 z は方向を表す。

次に、反射係数 R を用いて反射波の電界強度を表すと式(2)となる。

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^{\text{R}} &= E_{\text{TMx}}^{\text{R}} \mathbf{i} + E_{\text{TEy}}^{\text{R}} \mathbf{j} + E_{\text{TMz}}^{\text{R}} \mathbf{k} \\ &= \left(R_{\text{TE}} e^{j\omega t} \mathbf{j} + R_{\text{TM}} e^{j(\omega t - \frac{\pi}{2})} (\cos \theta_0 \mathbf{i} + \sin \theta_0 \mathbf{k}) \right) \\ &\quad \times F_0 e^{-jk_0(x \sin \theta_0 + z \cos \theta_0)} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 θ_0 は反射角 (= 入射角)、上付添字 R は反射波を表す。

式(2)の右辺第 1 項、及び第 2 項はそれぞれ位相が異なる直線偏波であり、これらはさらに円偏波の合成として下のように変形できる。

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^{\text{R}} &= \frac{R_{\text{TE}} + R_{\text{TM}}}{2} \left(e^{j\omega t} \mathbf{j} + e^{j(\omega t - \frac{\pi}{2})} (\cos \theta_0 \mathbf{i} + \sin \theta_0 \mathbf{k}) \right) \\ &\quad \times F_0 e^{-jk_0(x \sin \theta_0 + z \cos \theta_0)} \\ &\quad + \frac{R_{\text{TE}} - R_{\text{TM}}}{2} \left(e^{j\omega t} \mathbf{j} + e^{j(\omega t + \frac{\pi}{2})} (\cos \theta_0 \mathbf{i} + \sin \theta_0 \mathbf{k}) \right) \\ &\quad \times F_0 e^{-jk_0(x \sin \theta_0 + z \cos \theta_0)} \end{aligned} \quad (3)$$

式(1)、(3)より、円偏波の反射係数は、TEモード、TMモードそれぞれの反射係数を合成することによって求めることができる。すなわち、吸収体に右旋円偏波で入射した電波は、左旋円偏波と右旋円偏波が反射され、それぞれの反射係数を R_L 、 R_R とすると、

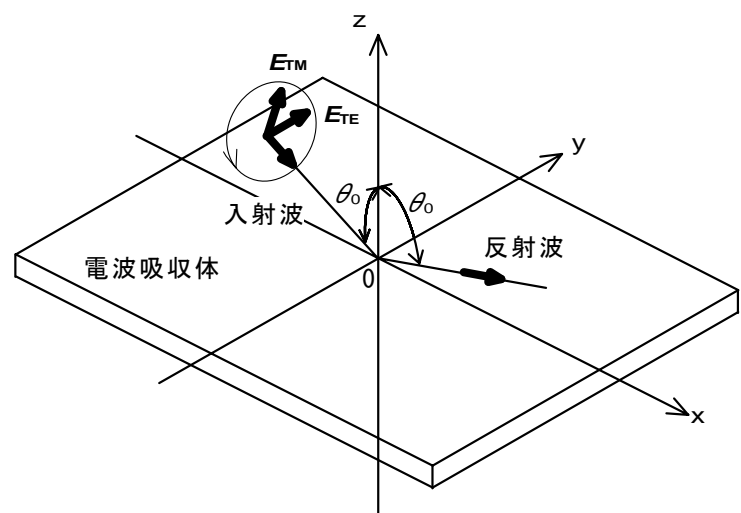


図4 電波吸収体へのTE, TM入射モデル

式(4)よりTE, TM波の直線偏波による反射係数の合成として求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} R_L &= \left| \frac{R_{TE} + R_{TM}}{2} \right| \\ R_R &= \left| \frac{R_{TE} - R_{TM}}{2} \right| \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

実際の測定では、図5のような直線偏波用ダブルリジッドガイドアンテナ(EMCO社製3115)を用い、ネットワークアナライザ(アンリツ(株)社製ME7808A)によるS21(複素伝送係数)を測定することで円偏波での吸収性能を求めた。比較のために他の測定機関(キーコム(株))で円偏波用アンテナと直線偏波用アンテナによる合成したものを参照値として比較した結果を図6に示す。図より、当场で測定した結果は、円偏波用アンテナで測定した結果と2dB以内で一致しており、本測定法の有用性が確認できた。以上から当场の測定システムを用いて円偏波に対応した電波吸収体の評価が可能であることが示された。

3. 結 言

本研究では円偏波用電波吸収体の性能評価法について検討した。その結果、微小ダイポールアンテナを送信源とした場合、通常の間接条件とされている $\lambda/(2\pi)$ の距離では、吸収性能を測定することはできず、試料とアンテナとの距離を 5λ 程度とることによって、 $\pm 1\text{dB}$ の誤差内で吸収性能を測定できることが分かった。また、直線偏波による吸収性能から円偏波の吸収性能を理論的に合成することによって評価する換算式を提示した。また、この評価結果と円偏波用アンテナによる評価結果を比較検討した結果、2dB以内で一致しておりその有用性が検証できた。



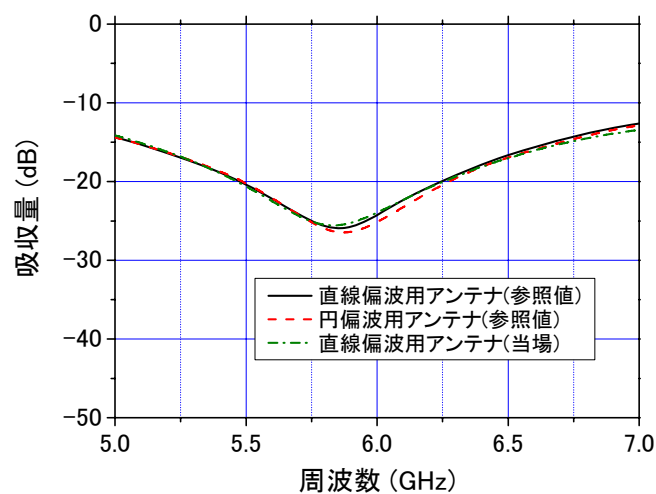
図5 斜入射による電波吸収測定

謝 辞

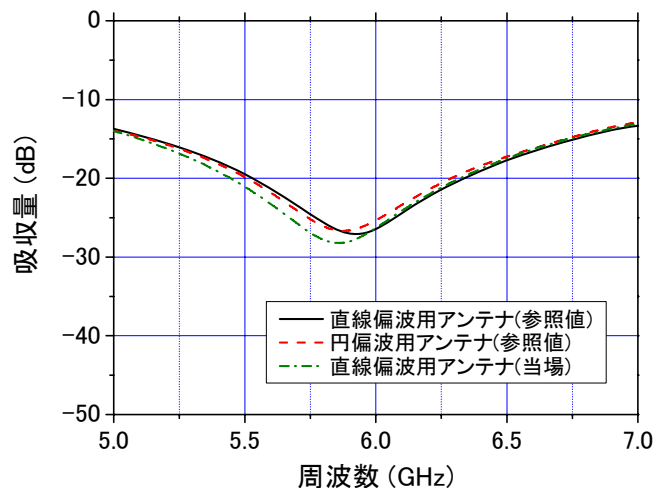
本研究を遂行するに当たり、円偏波による性能評価の際に測定設備のご提供を頂いた鈴木洋介氏(キーコム株式会社代表取締役)に感謝します。

参考文献

- 1) 橋本修. 電波吸収体入門. 森北出版, 1997, p. 26-65.
- 2) Stratton, J.A. Electromagnetic Theory. McGraw-Hill, Inc. 1941, p. 573-582.
- 3) 吉村慶之, 長野勇, 八木谷聡, 鈴木洋介, 南川俊治. ダイポール波源を考慮した電波吸収体の性能に関する検討. 信学ソ大. 2006, p. 288.
- 4) 畠山賢一, 細川幹夫, 坂井康彦, 戸川斉, 山内健次. 円偏波入射における反射係数について. 信学技報. EMCJ2001-12, p. 85-90.
- 5) 最新 電波吸収材料の開発[事例集]. 技術情報協会. 2006, p. 264-267.



(a) 入射角15°



(b) 入射角30°

図6 円偏波による電波吸収測定結果の比較